4 Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios. Inicialmente descreve-se o modo de ruptura dos 18 pilares, bem como os gráficos força *vs*. deformação especifica e força *vs*. deslocamento para cada pilar. Na seqüência faz-se uma comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos.

Finalizando, apresenta-se a avaliação dos resultados da tensão normal e da tensão de aderência ao longo da emenda.

4.1. Modos de ruptura

Os resultados gerais dos ensaios dos pilares são resumidos na Tabela 4.1. Para os pilares da *Série 1* a deformação especifica da barra indicada nessa tabela se refere à força de ruptura N_u , e representa o maior valor observado no extensômetro da barra situada junto da *Face A* do pilar; no caso dos pilares das *Séries 2* e 3 é o maior valor absoluto obtido em um dos extensômetros localizados na região de emenda.

A Tabela 4.1 apresenta ainda a deformação específica $\varepsilon_{smáx,2}$, como sendo o maior valor entre os dois extensômetros localizados fora da região de emenda (*Ext6D* ou *Ext6E*) dos pilares das *Séries 2* e 3.

Considerando-se que em elementos submetidos à flexo-compressão o concreto esmaga com valores de ε_c superiores 3,0‰, e que a deformação específica de escoamento ε_{sy} medida no ensaio da barra descrito no item 3.1.2 foi igual a 2,8‰, pode-se afirmar que o concreto esmagou após o escoamento da armadura comprimida em todos os pilares da *Série 1*, exceto no caso do pilar *P1-20* onde as deformações específicas medidas não chegaram a atingir tais valores. No caso do pilar *P1-20* a ruptura ocorreu numa região abaixo da altura média do pilar, ou seja, a aproximadamente 390 mm de altura com relação à base do pilar e fora da linha dos extensômetros (Figura 4.4). Tal fato pode explicar os baixos valores de deformações específicas registrados neste ensaio.

Pilar	0.4 **	f_c	f _{ct}	d	es	N _v	Nu	Ecmáx	Esmáx 1	Esmáx 2	· · · · ·		_
(<i>C∕ø</i>)	Ser.	(MPa)	(MPa)	(mm)	(mm)	(kŃ)	(kŇ)	(‰)	(‰)	(‰)	V _{máx}	v_y	R
P1-25		28.8	2.77	87.5	32.5	838	846	-3.22	-3.63		0.98	0.97	1
(2,00)		,0	_,	0.10	0_,0		0.0	0,==	0,00		0,00	0,01	
P1-20 (1.60)		27,0	2,69	93,75	38,75	-	513	-2,33	-2,24		0,63		
P1-10													
(0,80)	1	27,8	2,94	98,75	43,75	566	625	-2,27	-4,22*		0,75	0,68	1
P1-05		25.7	2 77	103 75	48 75	602	628	-2 58	-12 92		0.81	0 78	1
(0,40)			_,		10,10	002	020	2,00	.2,02		0,01	0,10	
P1-00 (0.00)		27,8	2,74	113,75	58,75	741	772	-4,12	-9,45		0,93	0,88	1
(0,00) P1-AE													
(-0,50)		26,0	2,59	118,75	63,75	686	790	-2,79	-17,46		1,00	0,87	1
P2-25		28.8	2 77	87 5	32.5		587	-2 66	-2 45	-2.06	0.68		2
(2,00)		20,0	2,11	07,0	02,0		001	2,00	2,10	2,00	0,00		-
P2-20 (1.60)		27,0	2,69	93,75	38,75		519	-1,93	-1,68*	-1,65*	0,64		2
P2-10										de de			_
(0,80)		27,8	2,94	98,75	43,75		694	-2,50	-2,09	**	0,83		2
P2-05	2	25.7	2 77	103 75	48 75		599	-1 47	-1 98	**	0 78		2
(0,40)		,	_,	,				.,	.,		0,10		_
P2-00 (0.00)		27,8	2,74	113,75	58,75		719	-0,95	-2,58	-2,70*	0,86		2
P2-AE			0.50	440 75	00 75		0.45	4 75	4.00*	4.00*	0.00		~
(-0,50)		26,0	2,59	118,75	63,75		645	-1,75	-1,69*	-1,93*	0,83		2
P3-25		28.8	2.77	87.5	32.5		564	-2.76	-0.97	-1.15	0.65		2
(2,00)		,_	_,	,-	,-			_,	-,	.,	-,		
P3-20 (1.60)		27,0	2,69	93,75	38,75		450	-1,85	-0,96	-1,09	0,56		2
P3-10		07.0	0.04	00.75	40.75		500	0.00	4 45*	4 47	0.00		~
(0,80)	3	27,8	2,94	98,75	43,75		569	-2,33	-1,15"	-1,47	0,68		2
P3-05	0	25.7	2.77	103.75	48.75		563	-1.74	-1.38*	-1.56*	0.73		2
(0,40)			_,					.,	.,	.,	3,. 3		
P3-00 (0.00)		27,8	2,74	113,75	58,75		634	-1,32	-2,33*	-1,96*	0,76		2
P3-AE			0.50	440 75	00 75		500	4.00	0.00	0.00*	0 7 /		•
(-0,50)		26,0	2,59	118,75	63,75		580	-1,60	-0,92	-0,82*	0,74		2

Tabela 4.1 – Resultados experimentais.

Na Tabela 4.1 tem-se:

* O maior valor de deformação especifica ocorreu num nível de força ligeiramente inferior à força de ruptura dada na tabela.

** Os extensômetros instalados fora da região da emenda foram danificados durante a etapa de concretagem.

f_c – resistência à compressão do concreto no dia do ensaio;

d – distância da borda mais comprimida da seção ao eixo da armadura
 longitudinal menos comprimida (Figura 4.1);

 N_u – força máxima observada no ensaio;

 e_s – excentricidade da força com relação ao eixo da armadura longitudinal menos comprimida (Figura 4.1);

 ε_c – deformação especifica no concreto comprimido correspondente a N_u , na metade do comprimento do pilar;

 N_y – força correspondente à deformação especifica de escoamento da armadura ε_{sy} = 2,8x10⁻³;

 $\varepsilon_{smáx,1}$ – deformação especifica na armadura mais comprimida, correspondente à N_{u} , sendo o valor observado no extensômetro da barra situada junto à *Face A* dos pilares da *Série 1*, posicionado na região da metade do comprimento do pilar, e no caso dos pilares das Séries 2 e 3 o maior valor absoluto obtido nos extensômetros localizados na região de emenda;

 $\varepsilon_{smáx,2}$ – o maior valor absoluto obtido em um dos extensômetros localizados fora da região de emenda (*Ext6D* ou *Ext6E*) dos pilares das *Séries* 2 e 3;

$$v_{máx} = \frac{N_{máx}}{bhf_c}$$
 é a força normalizada;

R = 1 indica o esmagamento do concreto após escoamento da armadura;

R = 2 indica o esmagamento do concreto após a ruptura da aderência na emenda.

Na Figura 4.1 é apresentado um detalhe do topo do pilar, que representa uma vista de frente com relação à *Face E* do pilar, mostrando-se o esquema de aplicação de força com relação a armaduras longitudinal. Nessa figura é mostrada ainda a excentricidade da força com relação ao eixo do pilar utilizada em todos os ensaios, que é de 20 mm.



Figura 4.1 – Detalhe da vista da Face E do pilar mostrando o eixo da força.

4.1.1. Pilares da Série 1: armadura longitudinal contínua

A ruptura dos pilares P1-25 e P1-20 ocorreu na região entre dois estribos localizada na altura média dos pilares, respectivamente, cerca de 420 mm e 390 mm da base do pilar, conforme pode ser observado na Figura 4.3 e Figura 4.4.

No ensaio do pilar P1-25 observou-se, posteriormente, que o apoio no topo não estava inteiramente livre à rotação e, portanto, algum momento pode ter sido introduzido, diminuindo-se assim a excentricidade inicial de 20 mm no topo do pilar.

A Figura 4.9 apresenta as deformações específicas na seção correspondente à metade da altura do pilar para 25%, 50%, 75% e 98% da força de ruptura dos pilares da *Série 1*. Nessa figura as deformações específicas foram medidas na *Face A* do pilar, correspondente à origem eixo horizontal nos gráficos (altura da seção), nas duas armaduras longitudinais e na *Face B*, correspondente à altura total da seção.

Conforme descrito no item 3.1.5.1, nos pilares da *Série 1* (com armadura longitudinal contínua) os extensômetros elétricos foram posicionados na região da metade do comprimento longitudinal em duas barras diagonalmente opostas de modo que as deformações medidas representam deformações específicas próximas da *Face E* ou da *Face D*. Por outro lado, as deformações específicas no concreto foram medidas no centro geométrico das *Faces A e B*, e não representam deformações no mesmo plano longitudinal em que se encontram os extensômetros das armaduras (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Alinhamento dos extensômetros no aço e no concreto para Série 1.

Observando-se a Figura 4.9 verifica-se que as deformações medidas no concreto e no aço próximos da face comprimida (*Face A*) não seguiram a

tendência linear esperada, o que provavelmente ocorreu devido ao posicionamento dos extensômetros (Figura 4.2), uma vez que foi identificado em alguns pilares das *Séries 2 e 3* valores substancialmente diferentes das deformações específicas medidas nas armaduras próximas das *Faces D e E* em extensômetro localizados num plano paralelo ao plano da seção transversal.

Conforme pode ser observado na Figura 4.9, no P1-25 as deformações específicas referentes a 25%, 50%, 75% de N_u se comportaram como se a força fosse centrada, uma vez que as deformações específicas medidas nas armaduras longitudinais e na face comprimida do pilar (*Face A*) apresentaram praticamente os mesmos valores, sendo que somente na curva correspondente a 98% da força de ruptura foram medidas maiores deformações específicas para a *Face A*.

Considerando todos os pilares da *Série 1,* o pilar P1-20 foi o que rompeu mais distante da seção média do pilar, e por isso as leituras captadas nos extensômetros apresentaram os menores valores absolutos de deformações, tanto do concreto quanto do aço (Figura 4.9). Ademais, em todos os outros pilares desta série verificou-se que a armadura longitudinal comprimida escoou antes da ruptura do pilar.

No pilar P1-25 a armadura longitudinal comprimida atingiu seu limite de escoamento com a força de 840 kN e o concreto atingiu a deformação de 3‰ com a força de 846 kN, que foi a força de ruptura.

Nos pilares P1-10, P1-05 e P1-00 a ruptura ocorreu na região da metade da altura do pilar, coincidindo com a localização dos extensômetros do concreto e das barras (Figura 4.5 a Figura 4.7).

No pilar P1-10 o extensômetro da armadura longitudinal comprimida registrou a deformação específica de -3,4% para a solicitação de $0,93N_u$, portanto acima do limite de escoamento da armadura utilizada. A força de ruptura deste pilar foi de 625 kN e o valor da deformação específica medida na face mais comprimida do concreto não atingiu -3%.

A ruptura do pilar P1-05 ocorreu de forma semelhante à do pilar P1-10, ou seja, o último valor da deformação específica medida na face mais comprimida do concreto não atingiu -3‰, e a armadura longitudinal mais comprimida escoou com aproximadamente $0,95N_u$.

No pilar P1-00 o limite de escoamento do aço foi atingido com aproximadamente $0,96N_u$. Conforme mostrado na Tabela 4.1, nesse pilar foi registrada a maior deformação específica de compressão no concreto dentre todos os ensaios realizados, com o valor igual a -4,1‰.

Com relação ao pilar P1-AE, que foi confeccionado com a metade da armadura exposta com relação à face comprimida, a ruptura ocorreu em dois espaçamentos entre estribos, sendo o espaçamento localizado na metade da altura do pilar e o outro imediatamente inferior a este (Figura 4.8). Nesse pilar a armadura escoou com aproximadamente $0,87N_u$, sendo que para este nível de solicitação o concreto apresentava a deformação específica de -1,8‰ na face mais comprimida do pilar. Para a solicitação de ruptura N_u , a deformação específica medida na face mais comprimida do pilar foi de -2,8‰ no concreto e de -17,5‰ no aço.



Figura 4.3 – Pilar P1-25 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A* em perspectiva, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.



Figura 4.4 – Pilar P1-20 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A* em perspectiva, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.



Figura 4.5 – Pilar P1-10 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.



Figura 4.6 – Pilar P1-05 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.



Figura 4.7 – Pilar P1-00 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.



Figura 4.8 – Pilar P1-AE após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.



Figura 4.9 – Deformações específicas na seção média dos pilares da Série 1 para quatro níveis de solicitações.

4.1.2.

Pilares da Série 2: armadura longitudinal com emenda de 470 mm

A ruptura dos pilares P2-25 e P2-20 foi caracterizada pela formação de uma fissura longitudinal ao longo das barras longitudinais, em toda a extensão da emenda. Toda a camada de concreto do cobrimento sobre a região da emenda destacou-se deixando a armadura descoberta, como pode ser visto principalmente na Figura 4.10 e na Figura 4.11.

No pilar P2-05 (cobrimento de 5 mm) após a ruptura pode ser visto o descolamento da camada de concreto na ponta inferior da barra emendada (Figura 4.13 (e)), sendo que devido ao pouco cobrimento o destacamento do concreto se concentrou na região em torno de cada emenda ficando a região central da *Face A* parcialmente conectada ao pilar (Figura 4.13 (c)).

No ensaio do pilar P2-25 a armadura (na extensão da emenda) próxima da *Face E* deformou mais do que a próxima da *Face D* (Figura 4.31 e Figura 4.32), de modo que as maiores deformações registradas nos extensômetros *Ext5E* e *Ext5D* foram respectivamente -2,06‰ e -1,40‰.

Diferente do que ocorreu no ensaio do pilar P2-25, as deformações específicas medidas em ambas as emendas do pilar P2-20 apresentaram valores semelhantes (Figura 4.33 e Figura 4.34). Neste ensaio a força máxima medida foi 519 kN, sendo que entre 480 kN e 500 kN as deformações específicas medidas em quase todos os extensômetro de ambas as emendas começaram a decrescer com o incremento de força ao mesmo tempo que as deformações específicas registradas na face mais comprimida do concreto continuaram aumentando, indicando uma ruptura da aderência da emenda no referido intervalo.

No ensaio do pilar P2-10, devido a uma instabilidade ocorrida nas rótulas dos atuadores hidráulicos, a ruptura só ocorreu em uma segunda tentativa. Na primeira tentativa o ensaio foi interrompido depois de atingir a força de 580 kN, sendo que a ruptura na segunda tentativa ocorreu após a força atingir 694 kN. Já na primeira tentativa os extensômetros *Ext2D* e *Ext2E* quando atingiram as respectivas deformações específicas de 0,7‰ (com força de 300 kN) e 0,6‰ (com força de 400 kN) praticamente mantiveram esses valores constantes de deformações específicas até o final do ensaio, mesmo com os demais extensômetros registrando normalmente aumento de deformações com o incremento da força. Portanto, admitindo a hipótese de que os referidos extensômetros não tenham sido danificados, esse fato indica que na posição dos

extensômetros *Ext2D* e *Ext2E* ocorreu a ruptura da ligação aço-concreto tendo o comprimento de emenda restante ainda transferindo as solicitações. Nesse ensaio foi verificado que os valores de deformações específicas foram semelhantes para as duas emendas (Figura 4.35 e Figura 4.36).

No ensaio do pilar P2-05 o comportamento das deformações específicas nas armaduras apresentou certa semelhança com o do Pilar P2-10, ou seja, a partir de determinada solicitação (aproximadamente 300 kN) os valores de deformações específicas medidas nos extensômetros *Ext2D* e *Ext2E* mudaram a tendência de crescimento indicando perda parcial de aderência (Figura 4.37 e Figura 4.38).

Para o pilar P2-00 a força máxima no ensaio foi de 719 kN, e a emenda próxima da *Face E* apresentou deformações específicas ligeiramente maiores do que as registradas na emenda próxima da *Face D* (Figura 4.39 e Figura 4.40). Quando a solicitação atingiu 700 kN as deformações específicas da emenda próxima da *Face E* inverteram a tendência, enquanto que as deformações específicas na emenda da face oposta aumentaram sua taxa de crescimento, indicando que inicialmente ocorreu a ruptura por aderência da emenda próxima da *Face E* com as solicitações sendo transferidas para a emenda da face oposta e em seguida deu-se a ruptura do pilar.



Figura 4.10 – Pilar P2-25 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes da parte inferior da emenda.



Figura 4.11 – Pilar P2-20 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes da parte superior da emenda.



Figura 4.12 – Pilar P2-10 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes da parte superior da emenda.



Figura 4.13 – Pilar P2-05 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes da parte inferior da emenda.



Figura 4.14 – Pilar P2-00 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) detalhe da região da emenda.



Figura 4.15 – Pilar P2-AE após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.

No Pilar P2-AE (metade do diâmetro da barra exposto), mesmo com a força máxima medida no ensaio atingindo 645 kN, na emenda próxima da *Face E* para solicitação superior a 300 kN as deformações específicas começaram a decrescer com o incremento das solicitações indicando a perda de aderência da emenda. A emenda próxima da *Face D* permaneceu ativa, sendo que para solicitações superiores a 550 kN também inverteu a tendência entrando em colapso também com perda de aderência (Figura 4.41 e Figura 4.42).

As deformações específicas indicadas na Figura 4.16 representam deformações específicas no concreto medidas na *Face A* do pilar, a média das deformações específicas nos extensômetros *Ext3D* e *Ext3E* que situam-se no mesmo plano que os extensômetros do concreto, e na *Face B*, correspondente à altura total da seção. Assim, a Figura 4.16 apresenta as deformações específicas na seção correspondente a metade da altura para 25%, 50%, 75% e 98% da força de ruptura para os pilares da *Série 2*. Na Figura 4.16 observa-se que a distribuição das deformações específicas na seção transversal dos pilares P2-25, P2-20 e P2-10 é praticamente linear, principalmente considerando as solicitações de 25%, 50%, 75% da força de ruptura, enquanto que para 98% da força e para os demais pilares com menores espessuras de cobrimento as deformações específicas na face comprimida apresentaram um comportamento aleatório.



Figura 4.16 – Deformações específicas na seção média dos pilares da *Série 2* para quatro níveis de solicitação.

4.1.3.

Pilares da Série 3: armadura longitudinal com emenda de 235 mm

Nos ensaios desta série o objetivo principal era evidenciar a ruptura prematura provocada pela perda de aderência, uma vez que a emenda foi subdimensionada com apenas metade do comprimento recomendado pela NBR 6118: 2003.

No ensaio do P3-25 os valores de deformações específicas se mantiveram semelhantes em ambas as emendas, de modo que os extensômetros *Ext5D* e *Ext5E* registraram deformações específicas em torno de -1,0% na ruptura. Observando o comportamento, em particular, das deformações específicas medidas nos extensômetros *Ext4D* e *Ext4E* percebe-se uma mudança de tendência nas suas curvas para os respectivos valores de solicitações de 280 kN e 220 kN (Figura 4.45 e Figura 4.46). As deformações específicas medidas nos referidos extensômetros continuaram a crescer, porém, numa taxa bem menor, indicando perda parcial da aderência nessa região da emenda. Próximo da força de ruptura (564 kN) as deformações específicas medidas nos extensômetros *Ext3D* e *Ext4D* e *Ext5D* começaram a decrescer com um incremento de força indicando a ruptura por perda de aderência na emenda localizada na *Face D*.

O comportamento das deformações específicas nas emendas no ensaio do pilar P3-20 foi similar ao do pilar P3-25, sendo que as curvas força *vs.* deformações específicas para as duas emendas mudaram de tendência no intervalo de força entre 180 kN a 300 kN, ou seja , nesse intervalo as deformações específicas diminuíram suas taxas de crescimento. O colapso do pilar teve início na emenda da *Face E* evidenciado pela queda acentuada nas deformações específicas medidas nessa emenda, comportamento típico da ruptura por perda de aderência (Figura 4.47 e Figura 4.48)

Nos ensaios dos pilares P3-10 e P3-05, para solicitações entre 300 kN e 400 kN, principalmente nos extensômetros *Ext4D*, *Ext4E*, *Ext5D e Ext5E*, foi verificada a mesma mudança de tendência em suas curvas força *vs.* deformações específicas observada nos ensaios dos pilares P3-25 e P3-20. No pilar P3-10 a ruptura da aderência ocorreu primeiro na emenda localizada na *Face E*, sendo que, de modo geral, as deformações específicas medidas foram semelhantes em ambas as emendas nesse ensaio (Figura 4.49 e Figura 4.50). Por outro lado, no ensaio do pilar P3-05 a emenda localizada na *Face E* apresentou maiores deformações específicas e a ruptura parece ter ocorrido simultaneamente nas duas emendas (Figura 4.51 e Figura 4.52).



Figura 4.17 – Pilar P3-25 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.



Figura 4.18 – Pilar P3-20 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.



Figura 4.19 – Pilar P3-10 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.



Figura 4.20 – Pilar P3-05 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.



Figura 4.21 – Pilar P3-00 após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.



Figura 4.22 – Pilar P3-AE após ruptura: (a) vista da *Face E*, (b) vista da *Face D*, (c) vista da *Face A*, (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.

No ensaio do pilar P3-00 as deformações específicas medidas nas emendas apresentaram valores maiores que os observados nos demais exemplares desta Série (Figura 4.53 e Figura 4.54). Ademais, neste ensaio o comportamento das deformações específicas indica uma melhor interação entre os materiais na região de contato.

É importante relembrar duas diferenças existentes derivadas do posicionamento dos extensômetro nas emendas dos pilares P2-00, P2-AE, *P3-00 e P3-AE* com relação aos demais pilares das *séries 2 e 3*. Em primeiro lugar, os extensômetros desses pilares foram colados na face diametralmente oposta à face em que os extensômetros foram colados nos demais pilares dessas séries, de modo que os extensômetros ficaram no lado externo da *Face A* (ver item 3.1.5.1). Em segundo lugar, como conseqüência desse posicionamento dos extensômetros, toda a região de contato aço-concreto ficou livre da influência da perda de contato devido à presença dos extensômetros. Isto pode explicar o bom desempenho dos pilares P2-00 e P3-00 referentes às deformações específicas lidas, e que a força de ruptura, mais elevada, atingida nesses ensaios não tenha sido apenas conseqüência da mudança do posicionamento das armaduras com relação à seção transversal.

No ensaio do pilar *P3-AE* após a solicitação de 300 kN as deformações específicas nos extensômetros *Ext3D*, *Ext4D*, *Ext3E* e *Ext4E* de ambas as emendas permaneceram praticamente constantes mesmo com o aumento de solicitação e de deformação específica na face comprimida do concreto (Figura 4.55 e Figura 4.56), indicando que a extensão ao longo do comprimento de emenda onde estavam localizados tais extensômetro havia se descolado do concreto circundante. Nesse ensaio as deformações específicas nos extensômetros *Ext2D* e *Ext3D* foram maiores as deformações específicas dos extensômetros *Ext4D* e *Ext5D* indicando que apenas a região próxima da ponta da barra contribuiu efetivamente para a aderência da emenda.

Na Figura 4.23 as deformações específicas medias no concreto e nas barras dos pilares P3-20, P3-10 e P3-05 apresentaram um comportamento aproximadamente linear, principalmente considerando as solicitações de 25% e 50% de N_u , enquanto que para 75% e 98% de N_u as deformações específicas na face comprimida apresentaram valores elevados com relação a curva esperada. As deformações específicas nas armaduras da emenda mostradas na Figura 4.23 correspondem à média das deformações específicas nos extensômetros *Ext3D* e *Ext3E*, que se situam no mesmo plano que os extensômetros do concreto, semelhante ao que ocorreu para os pilares da *Série 2*.



Figura 4.23 – Deformações específicas na seção média dos pilares da *Série 3* para quatro níveis de força.

4.2.

Curvas força vs. deformação específica e força vs. deslocamento

Neste item são apresentadas e comentadas as curvas força *vs*. deformação específica das armaduras e do concreto e força *vs*. deslocamento transversal dos pilares.

Os deslocamentos δ apresentados nas curvas força *vs.* deslocamento representam os deslocamentos transversais obtidos na seção localizada na metade da altura do pilar (Figura 4.24), que foram calculados considerando-se: $\delta = \delta_1 - \delta_2/2$, onde o segundo termo $\delta_2/2$ corresponde ao deslocamento de corpo rígido.



Figura 4.24 – Deslocamento transversal no pilar.

4.2.1. Pilares da Série 1: armadura longitudinal contínua

Na Figura 4.25 são apresentadas as curvas força *vs.* deformação específica do concreto dos pilares da *Série 1*, com exceção do pilar P1-25 que para uma melhor visualização, teve suas curvas apresentadas na Figura 4.26. Essas curvas para o concreto representam as leituras das deformações específicas de cada extensômetro colado na *Face A e Face B*, conforme descrito no item 3.1.5.3. Na Figura 4.25 e na Figura 4.26, a linha pontilhada representa a deformação específica na qual o concreto fissura (0,2 a 0,25 ‰). Deformações específicas de tração superiores ao intervalo indicam aberturas de fissuras.

As curvas força *vs.* deformação específica para as armaduras longitudinais dos pilares da *Série 1* são mostradas na Figura 4.27 e Figura 4.28. As deformações específicas indicadas nas curvas representam as leituras nos extensômetros posicionados na região da metade do comprimento longitudinal em duas barras diagonalmente opostas de modo que as deformações específicas medidas representam deformações específicas próximas da *Face E* ou da *Face D*, conforme descrito no item 3.1.5.1. Nessas curvas a linha tracejada indica a deformação específica de escoamento do aço de 2,8 ‰ obtida por meio do ensaio de compressão, descrito no item 3.1.2. Como pode ser observado na Figura 4.27 e na Figura 4.28, os extensômetros das armaduras longitudinais mais comprimidas registraram deformações específicas acima do limite de escoamento do aço para todos os pilares da *Série 1*, exceto para o pilar P1-20.

Na Figura 4.25 percebe-se que de uma forma geral, para uma solicitação constante, a deformação específica do concreto decresce do pilar P1-20 para o P1-AE. No caso do pilar P1-25 esse comportamento não foi observado, uma vez que a excentricidade aplicada nesse ensaio ficou acidentalmente diferente da utilizada para os demais ensaios. Para as deformações específicas medidas no aço o comportamento foi semelhante ao observado para o concreto (Figura 4.27). Esse comportamento observado nas curvas se deve ao fato de que, a distância entre as barras comprimidas e o ponto de aplicação da força vai aumentando à medida que a espessura do cobrimento vai diminuindo.

Na Figura 4.29 observa-se que os deslocamentos laterais dos pilares da Série 1 foram relativamente pequenos, sendo em todos os pilares desta série inferiores a 3,5 mm e foi observado nas curvas força *vs.* deslocamentos laterais que o pilar com armadura exposta o P1-AE apresentou o menor deslocamento final, apesar do referido pilar ter atingido o maior valor de v.









dos pilares da Série 1.



Figura 4.28 – Curvas força *vs.* deformação específica para as armaduras longitudinais do pilar P1-25.



Figura 4.29 – Curvas força vs. deslocamento transversal para os pilares da Série 1.

4.2.2. Pilares da Série 2: armadura longitudinal com emenda de 470 mm

As curvas força *vs.* deformação específica do concreto dos pilares da *Série* 2 são apresentadas na Figura 4.30. Assim como na *Série* 1 essas curvas representam as leituras das deformações específicas de cada extensômetro colado no centro geométrico da *Face A e da Face B* do pilar. Na Figura 4.30 observa-se que para uma solicitação constante, a deformação específica do concreto decresce do pilar P2-25 para o P2-00. No pilar P2-AE esse comportamento não foi observado, de modo que provavelmente a perda de aderência prematura em uma das emendas desse pilar transferiu mais solicitações para o concreto e por isso, a deformação específica observada no P2-AE, para uma solicitação constante, foi maior do que as observadas nos pilares P2-00 e P2-05.

As curvas força *vs.* deformação específica para as armaduras longitudinais dos pilares da *Série 2* são mostradas da Figura 4.31 a Figura 4.42. As linhas horizontais tracejadas indicadas por n_0 nessas figuras representam as solicitações em que foram registradas mudanças de tendência nas curvas, indicando o início da ruptura por aderência.

As deformações específica indicadas nessas curvas representam as leituras dos extensômetros instalados ao longo das emendas localizadas próximas da interseção da *Face A* com a *Face D* e da *Face A* com *Face E*. Nos pilares das *Séries 2 e 3* apenas as emendas da face mais comprimida (*Face A*) foram instrumentadas.

Durante o processo de concretagem alguns extensômetros foram danificados impossibilitando a obtenção das deformações específicas. Na Série 2 os extensômetros danificados foram: *Ext-6D* e *Ext-6E* no pilar P2-05; *Ext-1E* no pilar P2-00; e *Ext4D* no pilar P2-AE. No pilar P2-10 os extensômetros *Ext-6D* e *Ext-6E* não passaram no processo de calibração devido ao alto índice de erro apresentado, entretanto, foi possível ler as deformações específicas nestes extensômetros.

Nos ensaios dos pilares da *Série 2* nenhuma barra atingiu a deformação de escoamento do aço na região da emenda.

De modo geral, para qualquer valor da força, as deformações específicas nas barras ao longo da emenda foram aumentando na medida em que o ponto onde se localizava o extensômetro se distanciava da ponta da emenda, além disso, o gradiente de deformação específica aumentou com o incremento de solicitação para maiores distâncias do ponto instrumentado à ponta da barra.

Analisando as deformações nas emendas mais comprimidas de todos os pilares da *Série 2*, percebe-se que no P2-AE a indicação da perda de aderência ocorreu para solicitações relativamente baixas e nos pilares P2-10 e P2-05 a mudança de tendência nas curvas ocorreu de forma mais acentuada para os extensômetros situados imediatamente após o da ponta da emenda, indicados nas legendas das figuras como *Ext2D e Ext2E*. Foi verificado que em certos pilares o comportamento das deformações específicas foi substancialmente diferente entre emendas, por exemplo, no pilar P2-25 a emenda localizada na *Face E* apresentou deformações específicas superiores às registradas na emenda da *Face D* (Figura 4.31 e Figura 4.32).

As curvas força *vs.* deslocamento transversal para os pilares da *Série 2* são mostrados na Figura 4.43. Nessa figura se observa que o deslocamento dos pilares segue um comportamento similar ao das deformações do concreto. Não consta na Figura 4.43 a curva referente ao pilar P2-00, uma vez que foram observadas leituras inconsistentes nos deslocamentos fornecidos na régua de deslocamento linear (RDL) situada na metade da altura do pilar.

Os deslocamentos transversais observados nos pilares da Série 2 foram semelhantes aos dos pilares da Série 1, ou seja, os deslocamentos foram

relativamente pequenos, de modo que todos os pilares desta série também apresentaram valores inferiores a 3,5 mm.



Série 2.









Figura 4.32 – Pilar P2-25: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal na armadura

emenda localizada na Face E.









-0,0035 -0,0030 -0,0025 -0,0020 -0,0015 -0,0010 -0,0005 0,0000 0,0005 Deformação específica longitudinal na armadura

Figura 4.34 – Pilar P2-20: Curva força *vs*. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.







Deformação específica longitudinal na armadura Figura 4.36 – Pilar P2-10: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.





Figura 4.37 – Pilar P2-05: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face D*.



-0,0035 -0,0030 -0,0025 -0,0020 -0,0015 -0,0010 -0,0005 0,0000 0,0005 Deformação específica longitudinal na armadura

Figura 4.38 – Pilar P2-05: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.









Figura 4.40 – Pilar P2-00: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal na armadura

emenda localizada na Face E.



-0,0035 -0,0030 -0,0025 -0,0020 -0,0015 -0,0010 -0,0005 0,0000 0,0005 Deformação específica longitudinal na armadura Figura 4.41 – Pilar P2-AE: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo





Figura 4.42 – Pilar P2-AE: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.



Figura 4.43 – Curvas força vs. deslocamento transversal para os pilares da Série 2.

4.2.3. Pilares da Série 3: armadura longitudinal com emenda de 235 mm

As curvas força *vs.* deformação do concreto dos pilares da *Série 3* são apresentadas na Figura 4.44. Assim como nas *Séries 1 e 2*, essas curvas representam as leituras das deformações específicas de cada extensômetro colado no centro geométrico das *Faces A e B*. Na *Série 3* também foi observado a tendência verificada nas *Séries 1 e 2*, de modo que para uma solicitação constante, a deformação do concreto decresceu do pilar P3-20 para o P3-00, sendo observado comportamentos diferenciados nos pilares P3-25 e P3-AE.

As curvas força *vs*. deformação específica nas armaduras estão mostradas da Figura 4.45 a Figura 4.56. As linhas horizontais tracejadas indicadas por n_1 e n_2 nessas figuras representam as solicitações em que foram registradas mudanças de tendência nas curvas, indicando o início da ruptura por aderência.

De modo geral, o comportamento das deformações específicas nas armaduras dos pilares da *Série 3* apresentaram mudanças de tendência nas suas curvas para solicitações relativamente baixas (valores de força entre 200 kN e 400 kN), indicando perda parcial da aderência das emendas, uma vez que as deformações específicas medidas em certos extensômetros continuaram a crescer num gradiente bem menor após o referido intervalo de força.

Durante o processo de concretagem alguns extensômetros foram danificados impossibilitando a obtenção das deformações específicas. Na *Série 3* os extensômetros danificados foram: *Ext-6D* no pilar P3-25 e *Ext-5E* no pilar P2-AE.

As curvas força *vs.* deslocamento transversal para os pilares da *Série 3* são mostrados Figura 4.57 . Na *Série 3*, conseqüência da ruptura ter ocorrido para solicitações menores do que nas *Séries 1 e 2*, também os deslocamentos observados foram menores, sendo registrado em todos os pilares da *Série 3* valores inferiores a 2,5 mm, excetuando-se o deslocamento lateral do P3-10 que atingiu 3,2 mm na ruptura.



Figura 4.44 – Curvas força *vs.* deformação específica do concreto para os pilares da *Série 3*.





Figura 4.45 – Pilar P3-25: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face D*.



Figura 4.46 – Pilar P3-25: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.





Figura 4.47 – Pilar P3-20: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face D*.



Deformação específica longitudinal na armadura

Figura 4.48 – Pilar P3-20: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.



Deformação específica longitudinal na armadura Figura 4.49 – Pilar P3-10: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da

emenda localizada na Face D.



Deformação específica longitudinal na armadura

Figura 4.50 – Pilar P3-10: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.



-0,0035 -0,0030 -0,0025 -0,0020 -0,0015 -0,0010 -0,0005 0,0000 0,0005 Deformação específica longitudinal na armadura

Figura 4.51 – Pilar P3-05: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face D*.



Figura 4.52 – Pilar P3-05: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.



-0,0035 -0,0030 -0,0025 -0,0020 -0,0015 -0,0010 -0,0005 0,0000 0,0005 Deformação específica longitudinal na armadura

Figura 4.53 – Pilar P3-00: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face D*.



Figura 4.54 – Pilar P3-00: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.







-0,0035 -0,0030 -0,0025 -0,0020 -0,0015 -0,0010 -0,0005 0,0000 0,0005 Deformação específica longitudinal na armadura

Figura 4.56 – Pilar P3-AE: Curva força *vs.* deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na *Face E*.



Figura 4.57 – Curvas força vs. deslocamento transversal para os pilares da Série 2.

4.3. Comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores dos dados experimentais no escoamento e na ruptura. Nessa tabela a taxa mecânica de armadura é calculada pela expressão 4.1:

$$\omega = \frac{A_s f_v}{b h f_c} \tag{4.1}$$

onde a seção do pilar tem dimensões: b = 20 cm e h = 15 cm, e os valores de resistência à compressão do concreto f_c foram obtidos experimentalmente (Tabela 3.4).

Na Tabela 4.2 a força normalizada ν e o momento fletor normalizado μ foram calculados pelas expressões 4.4 e 4.5:

$$v = \frac{N}{bhf_c}$$
(4.2)

$$\mu = \frac{Ne}{bh^2 f_c} \tag{4.3}$$

onde $e = 2 \text{ cm} + \delta$, exceto no pilar P1-25, que devido a dificuldades no alinhamento durante o ensaio, verificou-se posteriormente que $e = 1 \text{ cm} + \delta$.

Pilar		f		Escoamento				Ruptura				
(<i>C/φ</i>)	(c∕ø) Série	(MPa)	ω	N _y (kN)	$\delta_{t(L/2)y}$ (cm)	V_y	μ_y	N _u (kN)	$\delta_{t(L/2)máx} \ (cm)$	$\mu_{m{lpha}x}$	V _{máx}	
P1-25 (2,00)	- 1	28,8	0,353	838	0,29	0,97	0,02	846	0,33	0,98	0,02	
P1-20 (1,60)		27,0	0,377					513	0,31	0,63	0,10	
P1-10 (0,80)		27,8	0,366	566	0,15	0,68	0,10	625	0,25	0,75	0,11	
P1-05 (0,40)		25,7	0,396	602	0,23	0,78	0,12	628	0,32	0,81	0,13	
P1-00 (0,00)		27,8	0,366	741	0,25	0,89	0,13	772	0,34	0,93	0,14	
P1-AE (-0,50)		26,0	0,391	686	0,09	0,88	0,12	790	0,23	1,01	0,15	
P2-25 (2,00)			28,8	0,353					587	0,35	0,68	0,11
P2-20 (1,60)		27,0	0,377					519	0,23	0,64	0,10	
P2-10 (0,80)	0	27,8	0,366					694	0,25	0,83	0,12	
P2-05 (0,40)	2	25,7	0,396					599	0,26	0,78	0,12	
P2-00 (0,00)		27,8	0,366					719	0,27	0,86	0,13	
P2-AE (-0,50)		26,0	0,391					645	0,27	0,83	0,13	
P3-25 (2,00)		28,8	0,353					564	0,23	0,65	0,10	
P3-20 (1,60)		27,0	0,377					450	0,16	0,56	0,08	
P3-10 (0,80)	3	27,8	0,366					569	0,31	0,68	0,11	
P3-05 (0,40)		25,7	0,396					563	0,24	0,73	0,11	
P3-00 (0,00)		27,8	0,366					634	0,14	0,76	0,11	
P3-AE (-0,50)		26,0	0,391					580	0,27	0,74	0,11	

Tabela 4.2 – Dados e resultados das solicitações experimentais.

Na Figura 4.58 são mostradas os resultados experimentais em função da espessura de cobrimento para as três séries de pilares. Na Figura 4.58, observase que para espessura de cobrimento superiores a 10 mm não é possível identificar nenhuma influência na capacidade resistente do pilar. Por exemplo, para os pilares com espessura de cobrimento de 20 mm os valores experimentais são praticamente os mesmos para pilares com armadura longitudinal contínua e para pilares com emenda recomendada pela NBR 6118: 2003. A tendência de perda de capacidade resistente à solicitação normal para os pilares com emenda por traspasse torna-se perceptível apenas para espessura de cobrimento inferiores a 5 mm. Observa-se também que essa perda de capacidade resistente é ampliada do pilar com o cobrimento de 5 mm para a o pilar com a metade do diâmetro da barra exposto.



Figura 4.58 – Força de ruptura normalizada v_{max} vs. espessura de cobrimento.

4.4. Tensão de aderência ao longo da emenda

Os valores de deformações específicas obtidos nos cinco extensômetros instalados ao longo da emenda foram convertidos em tensões normais por meio da relação $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$, onde o módulo de elasticidade usado foi $E_s = 219,7$ GPa, obtido no ensaio de resistência à compressão da barra de aço apresentado no item 3.1.2. e ε_s as deformações nos extensômetros instalados ao longo da emenda. A partir das tensões normais foram calculadas as tensões de aderência em cada um dos quatro trechos entre essas cinco posições dos extensômetro, por meio da expressão:

$$\tau_i = \frac{\pi \phi^2 \Delta \sigma_s}{4u \Delta x} \tag{4.4}$$

onde Δx é a distância entre extensômetros, e *u* é o perímetro da seção transversal a barra em contato com o concreto.

Para efeito de comparação com os demais pilares de cada série, os valores de τ_i dos pilares P2-AE e P3-AE foram calculados como se todo o perímetro da seção transversal da barra estivesse em contato com o concreto.

O valor médio da tensão de aderência relativo a cada emenda foi obtido por:

$$\tau_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i \tag{4.5}$$

onde n = 4.

Na Figura 4.59 e na Figura 4.60 são mostradas as curvas tensão de aderência VS. comprimento de traspasse das emendas situadas, respectivamente, próximas da Face D e da Face E dos pilares da Série 2. Na construção dessas curvas foram utilizadas as solicitações de 0,25N_u, 0,98N_u e as solicitações em que foram registradas as mudanças de tendência nas curvas força vs. deformação específica apresentadas no item 4.2.2 (Figura 4.31 a Figura 4.42). Esses solicitações estão indicados na legenda da Figura 4.59 e da Figura 4.60, bem como, por uma linha horizontal tracejada desenhada nas curvas força vs. deformação específica apresentadas no item 4.2.2. No pilar P2-AE a força de $0.98N_{\mu}$ foi substituída por $0.75N_{\mu}$, uma vez que para a força de $0,98N_u$ ocorreu grande aleatoriedade nas deformações.

Na Figura 4.65 e na Figura 4.66 são mostradas as curvas tensão de aderência *vs.* comprimento de traspasse dos pilares da *Série 3*. Essas curvas foram traçadas utilizando-se os mesmos critérios utilizados para traçar as curvas dos pilares da *Série 2*, entretanto as solicitações utilizadas para a *Série 3* foram de $0,25N_u$ e em outras duas diferentes solicitações onde foram registradas as mudanças de tendência nas curvas força *vs.* deformação específica. Essas duas diferentes solicitações foram indicadas por duas linhas horizontais tracejadas apresentadas no item 4.2.3 (Figura 4.45 a Figura 4.56).

Com base nos valores de tensão de aderência médios e máximos observados ao longo da emenda, foram construídos gráficos da tensão de aderência média normalizada por f_{ct} vs. c/ϕ dos pilares da Série 2 (Figura 4.61 e Figura 4.62) e da Série 3 (Figura 4.67 e Figura 4.68) e gráficos da tensão de aderência máxima normalizado por f_{ct} vs. c/ϕ dos pilares da Série 2 (Figura 4.63 e Figura 4.64) e da Série 3 (Figura 4.69 e Figura 4.70).

Como resultado final da análise realizada nos gráficos da tensão de aderência média normalizada (τ_m/f_{ct}), obteve-se a distribuição dos valores correspondentes à ruptura. Esses valores estão representados nas figuras por curvas tracejadas. Para uma melhor visualização, na Figura 4.71 são mostradas conjuntamente essas curvas de tensão de aderência média normalizado por f_{ct} vs. c/ϕ dos pilares das Séries 2 e 3.



Posição do extensômetro na emenda (cm)

Posição do extensômetro na emenda (cm)

Figura 4.59 – Tensão de aderência ao longo da emenda para os pilares da Série 2 para armadura da Face D.



Posição do extensômetro na emenda (cm)

Posição do extensômetro na emenda (cm)

Figura 4.60 – Tensão de aderência ao longo da emenda para os pilares da Série 2: para armadura da Face E.



Figura 4.61 – Razão τ_m/f_{ct} vs c/ϕ dos pilares da Série 2, para armadura da Face D.



Figura 4.62 – Razão τ_m/f_{ct} vs c/ϕ dos pilares da Série 2, para armadura da Face E.



Figura 4.63 – Razão τ_{MAX}/f_{ct} vs c/ϕ dos pilares da Série 2 para armadura da Face D.



Figura 4.64 – Razão τ_{MAX}/f_{ct} vs c/ϕ dos pilares da Série 2 para armadura da Face E.



Figura 4.65 – Tensão de aderência ao longo da emenda dos pilares da *Série 3* para armadura da *Face D*.



Figura 4.66 – Tensão de aderência ao longo da emenda dos pilares da *Série 3* para armadura da *Face E*.



Figura 4.67 – Razão τ_m/f_{ct} vs c/ ϕ dos pilares da Série 3, para armadura da Face D.



Figura 4.68 – Razão τ_m/f_{ct} vs c/ ϕ dos pilares da Série 3, para armadura da Face E.



Figura 4.69 – Razão τ_{MAX}/f_{ct} vs c/ ϕ dos pilares da Série 3, para armadura da Face D.



Figura 4.70 – Razão τ_{MAX}/f_{ct} vs c/ ϕ dos pilares da Série 3, para armadura da Face E.

Na Figura 4.72 são mostrados os valores de deformação específica nos extensômetros *Ext5D e Ext5E* de cada barra, ou seja, o extensômetro localizado a 47 cm da ponta da barra da emenda para a *Série 2* e a 23,5 cm para a *Série 3*. Essas deformações são correspondentes as forças indicadas pelas linhas horizontais tracejadas indicadas por n_0 para os pilares da *Série 2* (Figura 4.31 a Figura 4.42) e por n_2 para os pilares da *Série 3* (Figura 4.56).

Por meio da deformação específica obtida nesse extensômetro podese calcular a força no início da emenda, dada por $F = E_s \varepsilon_s A_s$. Para que a barra permaneça em equilíbrio com o concreto a força F deve ser igual a resultante de $\tau_m u I_b$, somada com força atuante na ponta da barra, onde u é o perímetro de contato entre o aço e o concreto e I_b é o comprimento da emenda. Portanto, a deformação específica no extensômetro *Ext5D (ou Ext5E)* é um parâmetro importante na avaliação da aderência da ligação aço-concreto.

Na Figura 4.71 observa-se uma tendência crescente no valor de τ_m/f_{ct} do pilar P2-20 ao P2-00, bem como do P3-20 ao P3-00. Vale lembrar, que para efeito de comparação com os demais pilares, os valores τ_m/f_{ct} dos pilares P2-AE e P3-AE indicados na Figura 4.71 foram calculados como se todo o perímetro circunferencial da barra estivesse em contato com o concreto, portanto, se for considerado só metade do perímetro no cálculo, uma vez que esses pilares apresentavam as barras expostas até a metade do seu diâmetro, os valores τ_m/f_{ct} para os pilares P2-AE e P3-AE seriam o dobro.

Conforme observado no modelo numérico apresentado no Anexo B, quando ocorreu uma redução na espessura do cobrimento, a tensão normal na direção Y σ_y na região do cobrimento torna-se sempre positiva (Figura B.18 (Ref. P5), Figura B.20 (Ref. P4) e Figura B.22 (Ref. P4)), ou seja, em toda a espessura do cobrimento o concreto ficou submetido a tensões de tração, indicando uma ruptura do cobrimento por fendilhamento do concreto.

Quando a força é incrementada no procedimento do ensaio, a ligação aço-concreto por adesão e por atrito é quebrada, de modo que a ligação passa a ser mantida somente pela aderência mecânica. Com o incremento de força as nervuras das barras começam a gerar valores cada vez mais elevados de tensões no concreto adjacente. As componentes radiais dessas tensões são resistidas pela espessura de cobrimento do concreto que envolve a barra e pela armadura transversal. Na medida em que a espessura do cobrimento vai diminuindo até que as barras fiquem expostas, as componentes radiais das tensões passam a ser resistida pela superfície de concreto que estava na parte interna da barra e pela armadura transversal. Desse modo, a pouca espessura de cobrimento gerou essa tendência crescente no valor da τ_m/f_{ct} do pilar P2-20 ao P2-00.

Observa-se na Figura 4.71 que os pontos referentes a emenda da *Face E* dos pilares P2-25 ($c/\phi = 2,0$) e P3-05 ($c/\phi = 0,4$) apresentaram valores elevados de τ_m/f_{ct} . Verificando-se os gráficos de deformações específicas em cada pilar percebeu-se que nestes pilares, de modo mais acentuado, a emenda da *Face E* teve valores de deformação específica maiores que os da *Face D*. Tal comportamento parece ter influenciado diretamente no valor da τ_m/f_{ct} .

A Figura 4.73 mostra uma avaliação do valor médio as deformações específicas medidas no extensômetro *Ext5* para c/ϕ variando de 0,8 a 0 com relação ao valor médio para $c/\phi = -0,5$. Na figura foram considerados apenas relação c/ϕ inferiores a 0,8, ou seja, espessuras de cobrimentos menores que 10 mm. Na Figura 4.73 foram traçadas duas curvas uma para a *Série* 2 e outra para *Série* 3. Na Figura 4.74 a curva de aproximação foi traçada considerando-se todos os pontos *Serie* 2 e *Serie* 3 de forma conjunta, de modo a representar o comportamento global.

Conforme pode ser visto na Figura 4.74 o valor da deformação específica passa de aproximadamente de 1,6‰ (média de c/ϕ variado de 0 a 0,8) para o valor de 0,9‰ (média de c/ϕ = -0,5), indicando que deixar a armadura com metade do diâmetro exposto reduziu a resistência de aderência para 56% do valor de armadura com cobrimento. Considerando-se os valores apresentados na Figura 4.73, observa-se que para a barra dos pilares da *Série 2* essa redução na resistência de aderência foi 54% e para os pilares da *Série 3* foi 61%.



Figura 4.71 – Razão τ_m/f_{ct} vs. c/ϕ dos pilares da *Série 2 e 3*, para as forças de ruptura por aderência.



Figura 4.72 – Deformação no *Ext5 vs. c/\phi* dos pilares das *Série 2 e 3*, para as forças de ruptura por aderência.



Figura 4.73 – Deformação no *Ext5 vs. c/\phi* dos pilares das *Série 2 e 3,* para as forças de ruptura por aderência: média de cada série.



Figura 4.74 – Deformação no *Ext5 vs. c/\phi* dos pilares das *Série 2 e 3,* para as forças de ruptura por aderência: média de todos os valores.

4.5. Comparação da tensão normal na ponta e no início da emenda

A Tabela 4.3 são dados os valores das tensões nas pontas das barras emendadas σ_p e nas outras extremidades das emendas σ_i em cada pilar, considerando a força de ruptura por aderência, ou seja, as tensões foram calculada com as deformações correspondentes as forças indicadas pelas linhas horizontais tracejadas indicadas por n_0 para os pilares da *Série 2* (Figura 4.31 a Figura 4.42) e por n_2 para os pilares da *Série 3* (Figura 4.45 a Figura 4.56).

Considerando-se que o valor médio da resistência à compressão do concreto f_{cm} em todos os ensaios foi de 27 MPa, verificou-se que os extensômetros colados próximo da ponta da emenda apresentaram valores de tensão de 1,7 f_{cm} para os pilares da *Série 2 e* 1,9 f_{cm} para os pilares da *Série 3*.

Nos ensaios realizados por QUINTANA (2005), onde o diâmetro nominal da barra foi de 16 mm, observaram-se valores de tensão de 3 a 5 vezes f_{cm} .

Tabela 4.3 – Tensões normais na ponta e na outra extremidade da emenda das barras: valores para a força de ruptura por aderência.

c/ø	σ _i (MPa)	σ_p (MPa)	σ_p/σ_i	σ _i (MPa)	$\sigma_{ m p}$ (MPa)	σ_p/σ_i				
	Pilare	es da Sér	rie 2	Pila	res da Sér	ie 3				
	Emendas localizadas na Face D									
2,0	49,1	281,6	0,17	60,9	216,7	0,28				
1,6	24,2	315,5	0,08	68,1	211,6	0,32				
0,8	*	358,3	*	63,4	251,5	0,25				
0,4	66,6	426,2	0,16	31,4	208,3	0,15				
0,0	98,9	485,4	0,20	72,9	353,1	0,21				
-0,5	72,9	344,1	0,21	14,9	153,8	0,10				
	Emendas localizadas na Face E									
2,0	25,4	516,2	0,05	14,7	182,8	0,08				
1,6	40,4	353,3	0,11	69,4	188,7	0,37				
0,8	28,7	435,4	0,07	63,2	207,4	0,30				
0,4	13,2	361,7	0,04	28,3	295,3	0,10				
0,00	*	511,2	*	89,9	374,4	0,24				
-0,50	45,9	192,7	0,24	37,3	157,7	0,24				

Esses resultados evidenciam que, quando o diâmetro da barra diminui também diminui a influência da força na ponta da barra no comportamento da emenda, semelhante ao apresentado no item 2.5.2.3 (PARK e PAULAY (1975)), onde verificou-se que para o caso das emendadas por traspasse na armadura longitudinal com o diâmetro menor do que 14 mm, o estudo revelou que a força resistida pela ponta da barra tem pouca influência no comportamento da emenda.

Analisando o valor médio da relação σ_p/σ_i , verificou-se que a ponta da barra contribuiu com 22% da força total resistida pela emenda para os pilares da *Série 3* e com 13% para os pilares da *Série 2*.

4.6.

Comparação da Tensão de Aderência Média Experimental com a Resistência de Aderência segundo a NBR 6118: 2003

A Tabela 4.4 apresenta os valores de tensão de aderência médios e máximos obtidos experimentalmente para cada pilar comparado com a resistência de aderência da NBR 6118: 2003.

Se considerarmos que os pilares romperam por perda de aderência, a tensão de aderência τ_m é sua resistência de aderência.

Comparando-se as tensões de aderência média obtida experimentalmente com a resistência de aderência f_b calculada segundo a NBR 6118: 2003, se observa que os valores de τ_m são menores que f_b . Vale lembrar que o cálculo segundo a NBR 6118: 2003 não leva em conta o efeito do cobrimento nem da armadura transversal.

Um outro ponto importante é que na resistência da aderência obtida experimentalmente dever ser considerada a parcela devido à resistência da ponta da emenda, conforme mostrado no item 4.5.

Tabela 4.4 – Tensão de aderência na emenda: valores para a força de ruptura por aderência.

Pilar	Pilar Série		f _{ct} (MPa)	f _b (MPa)	<i>τ_{m.exp}∕f_b</i> Face D	τ _{m.exp} ∕f _b Face E	τ _{máx.exp} /f _b Face D	τ _{máx.exp} /f _b Face E		
P2-25		2,0	2,77	6,24	0,26	0,56	0,52	0,91		
P2-20		1,6	2,69	6,05	0,34	0,37	0,44	0,58		
P2-10	2	0,8	2,94	6,60	0,44	0,44	0,98	0,62		
P2-05	2	0,4	2,77	6,23	0,41	0,42	0,66	0,74		
*P2-00		0,0	2,74	4,32	0,62	0,67	1,01	0,79		
*P2-AE		-0,5	2,59	4,08	0,47	0,26	0,60	0,39		
P3-25		2,0	2,77	6,23	0,35	0,38	0,50	0,49		
P3-20		1,6	2,69	6,05	0,34	0,28	0,62	0,47		
P3-10	2	0,8	2,94	6,60	0,40	0,31	0,75	0,73		
P3-05	3	0,4	2,77	6,23	0,40	0,61	0,65	0,88		
*P3-00		0,00	2,74	4,32	0,92	0,94	1,29	1,84		
*P3-AE		-0,50	2,59	4,08	0,68	0,42	1,19	1,08		
$*f_b/f_{ct} = 1.575$ para os pilares com $c/\phi = 0$ e $c/\phi = -0.50$, considerando que										

as barras estão em situação de má aderência e f_b/f_{ct} =2,25 para os demais pilares.